

**РАЗДЕЛЕНИЕ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ
НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА И МЕТОДА ОСРЕДНЕНИЯ****Ю. В. Антонов***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 15 марта 2016 г.

Аннотация: *приведены результаты разделения неприливных вариаций силы тяжести на составляющие в г. Бишкек (Кыргызстан). Спектральный анализ позволяет определить основные периоды колебаний. С помощью метода осреднения выделяются высокочастотные колебания. Показано, что спектры осредненных неприливных вариаций практически идентичны в течение всего года. То же самое отмечается для остаточных вариаций. Вероятно, остаточные вариации связаны с внутренними гравитационными волнами атмосферы.*

Ключевые слова: *лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливные вариации силы тяжести; спектральный анализ; метод осреднения; внутренние гравитационные волны.*

**THE SEPARATION OF NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY ON THE BASIS
OF SPECTRAL ANALYSIS AND THE METHOD OF AVERAGING**

Abstract: *the results of the separation of the non-tidal variations of gravity on the components in Bishkek (Kyrgyzstan). Spectral analysis allows to determine the main periods of the oscillations. Using the method of averaging are allocated to high frequency oscillation. It is shown that the averaged spectra of non-tidal variations are almost identical throughout the year. The same is valid for the residual variations. Probably, the residual variations associated with internal gravity waves of the atmosphere.*

Keywords: *lunar-solar variations in gravity; non-tidal variations of gravity; spectral analysis; method of averaging; internal gravity waves.*

Введение

Как показывают исследования [1–7, 10], наблюдаемые изменения силы тяжести во времени имеют достаточно сложную структуру, являются суммой различных субгармонических колебаний и неперiodических изменений. К первым относятся косинусоидальные по форме лунно-солнечные вариации, ко вторым – землетрясения, удары корональных выбросов масс по магнитосфере и метеорных потоков по атмосфере Земли. Чтобы оценить причины образования различных вариаций силы тяжести необходимо каким-то образом провести их разделение на составные части. Надо отметить, что набор способов разделения не велик при кажущемся большом числе методов разделения. В первую очередь к таким методам надо отнести спектральный анализ, чему в основном будет посвящена статья. Сюда же можно отнести метод осреднения и преобразование Гильберта–Хуанга [9, 11].

Исходные данные

В статье анализируются мониторинговые наблюдения изменения силы тяжести во времени, выполненные на Бишкекском геодинимическом полигоне РАН (г. Бишкек, Кыргызстан). Измерения силы тяже-

сти проводились гравиметром GC-5 AUTOGRAV, который расположен в штольне в 30 км за городом. Прибор позволяет измерять силу тяжести и наклоны по двум горизонтальным ортогональным осям. Одновременно программное обеспечение прибора позволяет вычислять теоретические значения силы тяжести от Луны и Солнца, которые вычитаются из наблюдаемых значений. Оставшуюся часть измерений условно назовем неприливной вариацией. Под неприливыми вариациями силы тяжести будем понимать все изменения этих полей, исключая лунно-солнечные вариации силы тяжести, вне зависимости от источника их происхождения. Так что неприливая вариация может служить источником для изучения внутреннего строения Земли и космического пространства вокруг Земли.

Методика обработки гравиметрических измерений

При наблюдении вариаций силы тяжести дело с исключением влияния Луны и Солнца обстоит достаточно просто. Современные гравиметры оснащены программным продуктом, который позволяет рассчитывать притяжение Луны и Солнца и исключать притяжение из общего наблюдаемого поля. Поэтому по-

лученные вариации силы тяжести в мониторинговых наблюдениях не содержат в себе какой-то неучтенной значимой части лунно-солнечных вариаций. Оставшаяся часть вариаций, после исключения лунно-солнечной части, содержит в себе эффекты влияния от внешних и внутренних источников геодинамической системы Земля–Луна–Солнце.

Начнем рассмотрение вариаций в «спокойные» дни. На рис. 1а зафиксирована кривая вариаций силы тяжести за период с 3 августа по 11 августа 2012 года.

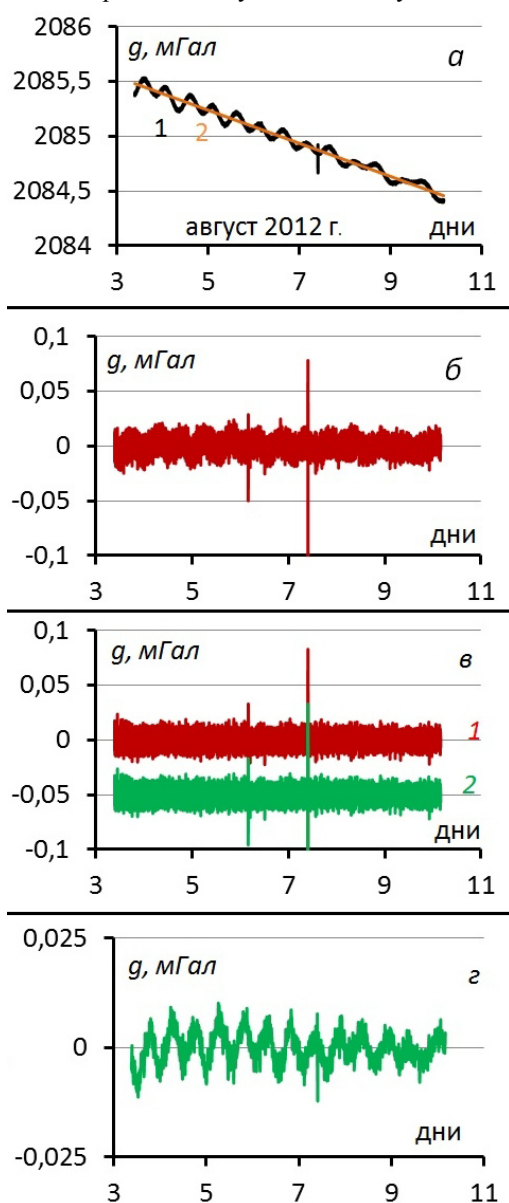


Рис. 1. Разделение лунно-солнечных вариаций на неприливые, осредненные и остаточные вариации силы тяжести: а – наблюдаемые лунно-солнечные вариации силы тяжести: 1 – наблюдаемая вариация силы тяжести; 2 – смещение нуля-пункта гравиметра (линейный фон); б – неприливая вариация силы тяжести после исключения лунно-солнечных вариаций и нуля-пункта гравиметра; в – остаточные неприливые вариации: 1 – остаточная вариация после исключения лунно-солнечной вариации и линейного фона; 2 – остаточная вариация после вычета осредненных значений из наблюдаемого поля; г – осредненная неприливая вариация силы тяжести.

На кривой видно изменение силы тяжести под действием Луны и Солнца, представляющее собой квазикосинусоидальные колебания с периодом от полусуточных до суточных, имеющие характерную модуляцию амплитуды в виде отдельных волновых пакетов, создающих сложную картину биений. Наблюденная кривая силы тяжести (рис. 1а) осложнена линейным фоном. Считается, что изменение остаточной аномалии силы тяжести по линейному закону обусловлено смещением нуля-пункта гравиметра. Гравиметр находится в штольне с постоянной температурой. Объяснить такое изменение силы тяжести только за счет смещения нуля-пункта все-таки трудно. Дело в том, что смещение в 2009 г. было положительным [2], в течение 2010 г. оно постепенно сменилось отрицательным, оставаясь минимальным по амплитуде. Далее по сегодняшний день смещение остается отрицательным, увеличиваясь по амплитуде. Вероятно, линейное изменение фона зависит не только от смещения нуля-пункта гравиметра, но также от изменения силы тяжести в результате нутационного движения оси Земли при вращении вокруг Солнца (период 18,6 лет). Само исключение линейного изменения силы тяжести не представляет трудностей [2, 3].

Обсуждение неприливых вариаций силы тяжести

После соответствующей обработки [2, 3] наблюдаемых вариаций силы тяжести (рис. 1а) получена так называемая неприливая вариация силы тяжести (рис. 1б). Данная вариация (рис. 1б) представляет собой кривую высокочастотных колебаний, которые в свою очередь модулируются более длиннопериодными колебаниями. Был проведен спектральный анализ неприливной вариации (рис. 1б), результаты которого представлены на рис. 2а. На периодограмме спектра (рис. 2а) очень четко выделяется максимум с периодом 12 ч 29 мин. (749 мин.), на несколько порядков превышая остальные максимумы. В сторону увеличения периодов выделяются более слабые максимумы 1082, 1391 и 1947 мин. В сторону уменьшения периодов амплитуды колебаний резко падают и начинают слабо возрастать лишь в интервале 2 – 20 мин. (рис. 2б).

Природа модулирующих колебаний достаточно ясна. Период 12 ч 29 мин. близок к полусуточной волне лунно-солнечных колебаний M2. Но ведь при вычислении неприливной вариации силы тяжести (рис. 1б) с помощью расчетов были удалены лунно-солнечные вариации. Следовательно, используемые в программном комплексе гравиметров формулы или не обеспечивают полного учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести, или причина кроется в чем-то другом. Попробуем разделить короткопериодные и полусуточные колебания в неприливной вариации (рис. 1б). Разность в длительности периодов составляет более порядка, поэтому используем самый простой метод – метод осреднения. В результате этой операции получены осредненные значения неприливной вариации (рис. 1г). Вычитая осредненные значения

неприливной вариации (рис. 1г) из неприливной вариации (рис. 1б), получим остаточную неприливную вариацию (рис. 1в, кривая 1). Остаточные неприливно-ые вариации имеют периоды колебаний в пределах 2 – 20 мин. (рис. 2в). Спектральная плотность мощности представлена на рис. 2г. Форма спектра типичная для гармонических колебаний.

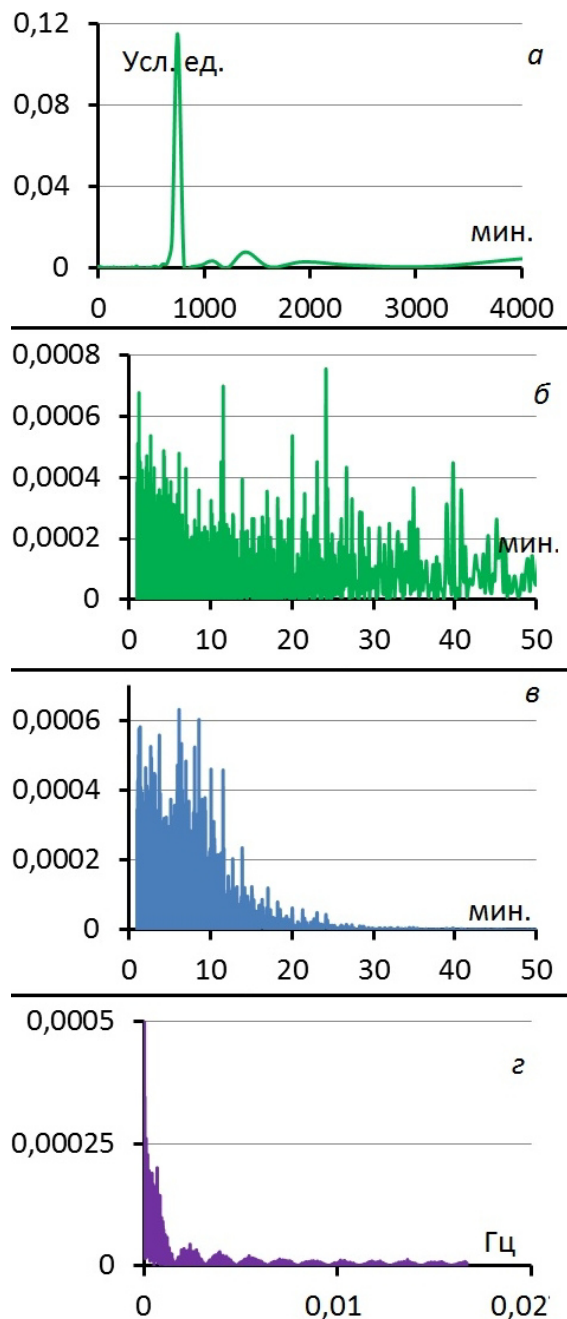


Рис. 2. Графики спектральной плотности мощности и периодограммы в августе 2012 г.: а – периодограмма спектра остаточной вариации силы тяжести (см. рис. 1б) на интервале 2 – 4000 мин; б – периодограмма спектра остаточной вариации силы тяжести (см. рис. 1б) на интервале 2 – 50 мин; в – периодограмма спектра остаточной неприливной вариации силы тяжести (см. рис. 1в, кривая 1) на интервале 2 – 50 мин; г – график спектральной плотности мощности остаточной неприливной вариации силы тяжести (см. рис. 1в, кривая 1).

Обратим внимание на рис. 1в (кривая 2). Кривая 2 ничем не отличается от кривой 1 не только визуально, но и по частотным характеристикам. Но кривая 2 получена другим образом. Наблюдаемые значения вариаций силы тяжести (рис. 1а, кривая 1) были осреднены, а затем осредненные значения вычтены из наблюдаемых, т.е. проведена та же процедура разделения полей, что и для получения кривой 1 на рис. 1в. Таким образом, появляется возможность вычисления остаточных неприливно-ых вариаций без учета влияния лунно-солнечных вариаций и нуля-пункта. Поскольку пульсации силы тяжести имеют те же периоды, что и остаточные неприливно-ые вариации [1, 5, 6], то способ осреднения можем использовать для вычисления пульсаций напрямую по наблюдаемым значениям. В данном конкретном случае использовали осреднение с размером скользящего окна 10 мин. Наиболее оптимальный вариант осреднения с интервалом 5–10 мин., что легко выявить на расчетных лунно-солнечных вариациях. Добавим, что вычисление остаточных неприливно-ых вариаций можно сделать с помощью сплайн сглаживания, на что указывалось в [6]. Предпринималась попытка разделения с помощью преобразования Гильберта – Хуанга [9, 11], но результаты оказались худшими по сравнению с методами осреднения и сплайн-сглаживания.

Проанализируем осредненные и остаточные неприливно-ые вариации. Для начала сравним неприливно-ые вариации (рис. 1б) и осредненные неприливно-ые вариации (рис. 1г) с расчетными лунно-солнечными вариациями (рис. 3).

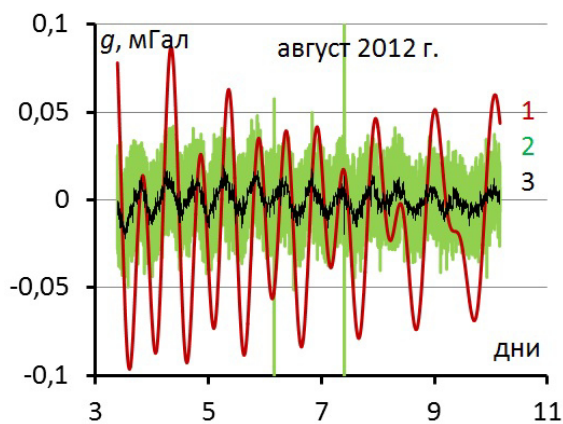


Рис. 3. Сравнение лунно-солнечных вариаций силы тяжести и остаточной вариации: 1 – лунно-солнечная вариация; 2 – остаточная вариация силы тяжести; 3 – осредненная остаточная вариация силы тяжести.

Для более наглядного сравнения лунно-солнечных и неприливно-ых вариаций, последние по амплитуде увеличены в три раза. В области минимальных и максимальных значений неприливно-ые вариации близки к нулю, где вообще-то, по общим рассуждениям, должны быть максимальные расхождения с расчетными данными. Значит, расхождения не определяются использованием тех или других формул для расчета лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Макси-

мальные расхождения приурочены к максимальным градиентам лунно-солнечных вариаций, где вариации по амплитуде близки к нулю. Видимо, причина появления осредненных неприливых вариаций, имеющих полусуточный период, связана с процессами, происходящими в земной коре из-за разности скоростей изменения во времени гравитационного поля и деформации горных пород.

Далее обратим внимание на частотные спектры осредненных неприливых вариаций (рис. 4) для различных временных дат. Спектры достаточно близки по форме и набору главных частот. Практически на всех спектрах за период 2015 г. для промежутка 1000–16000 мин. выделяются главные частоты 2020, 2520, 3360 и 4040, 5030, 6730 мин. Последние между собой связаны отношением полуволна/волна. Возможно, указанные периоды связаны с нутациями земной оси. В средней части спектра (100–1000 мин.) резко выделяется полусуточная лунно-солнечная волна, о которой уже упоминалась выше. В высокочастотной части спектра (интервал 2–100 мин.) четко выделяются периоды колебаний, связанные с собственными колебаниями Земли, которые достаточно полно изучены. Обратим еще внимание на периоды, находящиеся в интервале 2–25 мин. Казалось бы, что подобных колебаний на осредненных вариациях силы тяжести не

должно быть, но они проявились. Дело в том, что интервал осреднения (10 мин.) сопоставим с интервалом колебаний, а в случае, когда колебания соизмеримы с интервалом осреднения, они полностью не исключаются, что определяется недостатками метода осреднения.

Но иногда спектры осредненных вариаций силы тяжести очень резко отличаются от типовых спектров (рис. 4). Особенно это касается высокочастотной части спектра (рис. 5а). Это отличие объясняется наличием землетрясений, которые в Северном Тянь-Шане происходят часто. Значения показаний гравиметра во время землетрясений могут превышать значения неприливых вариаций силы тяжести на два три порядка (рис. 5б). Если отбросить часть измерений вариаций, созданных землетрясением, то вновь полученный спектр (рис. 5в) будет аналогичным спектрам на рис. 4а. Осредненная вариация будет выглядеть иначе (рис. 5в). Указанная ситуация просчитана для различных моделей (рис. 6г). В качестве моделей были взяты три прямоугольных сигнала шириной 20, 50 и 200 условных единиц. Интервал землетрясений намного меньше времени наблюдений (см. рис. 5б). На рис. 6 б, в, г представлены спектры моделей, у которых начинается резкое увеличение амплитуды спектра после интервала, равного ширине сигнала.

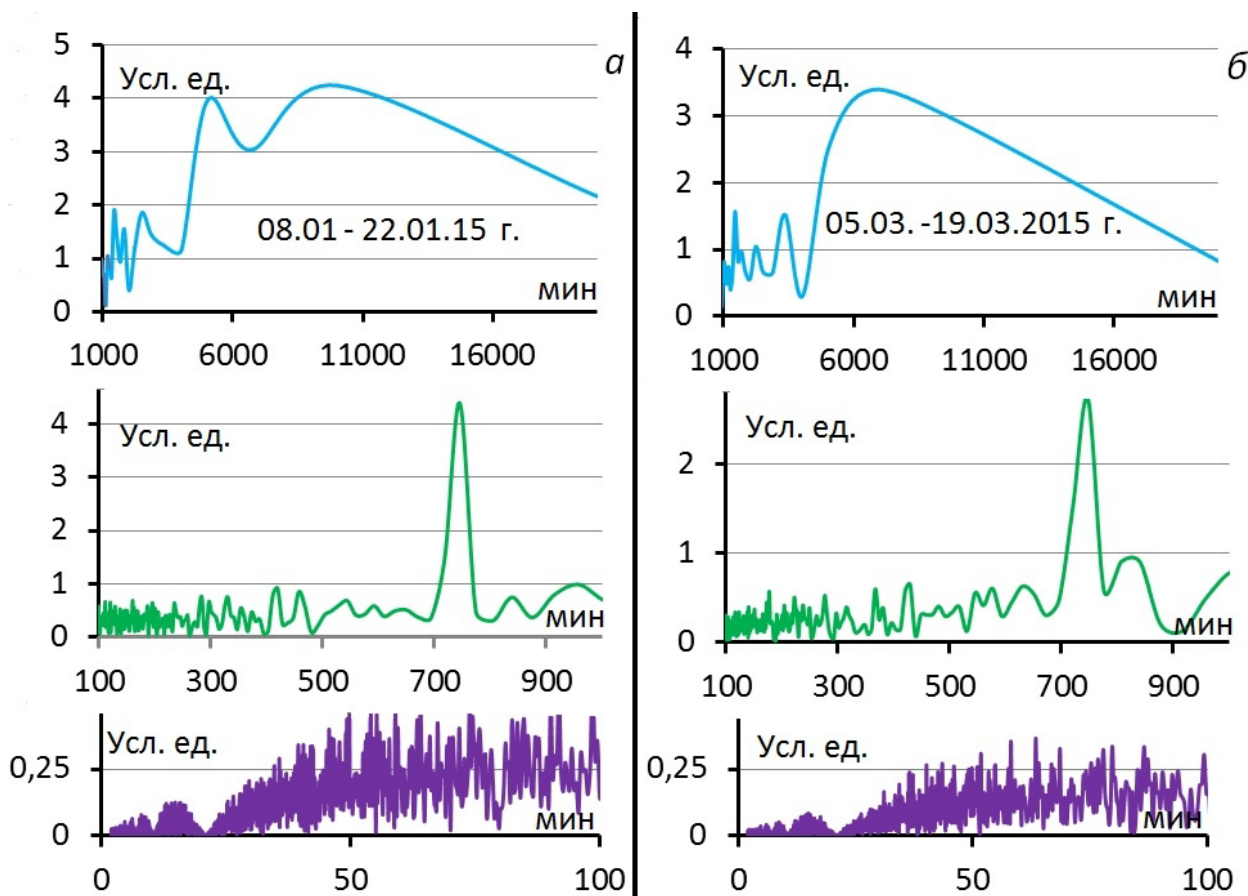


Рис. 4. Сравнение периодограмм осредненной неприливной вариации силы тяжести в январе - марте 2015 г.: а – график спектра осредненной неприливной вариации силы тяжести 08.01. – 22.01.2015 г.; б – график спектра осредненной неприливной вариации силы тяжести 05.03. – 19.03.2015 г.

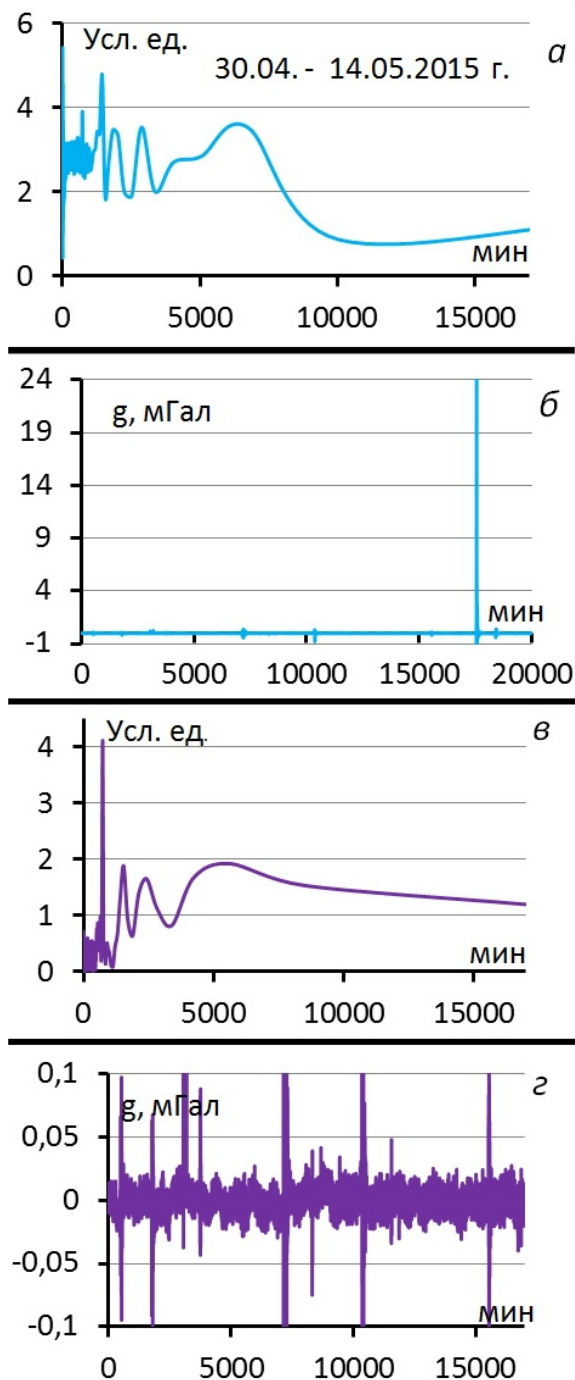


Рис. 5. Влияние землетрясений на спектр неупорядоченных вариаций силы тяжести: а – спектр неупорядоченных вариаций силы тяжести при наличии землетрясения; б – неупорядоченная вариация силы тяжести при наличии землетрясения; в – спектр неупорядоченных вариаций силы тяжести без землетрясения; г – неупорядоченная вариация силы тяжести без землетрясения.

Теперь перейдем к сравнению спектров осредненных и остаточных неупорядоченных вариаций силы тяжести (рис. 7). В спектрах остаточных вариаций преобладают, естественно, колебания малых периодов (интервал от 2 до 50 мин.). Подобные спектры наблюдаем для пульсаций гравитационного поля. Спектры пульсаций отличаются от спектров остаточных только

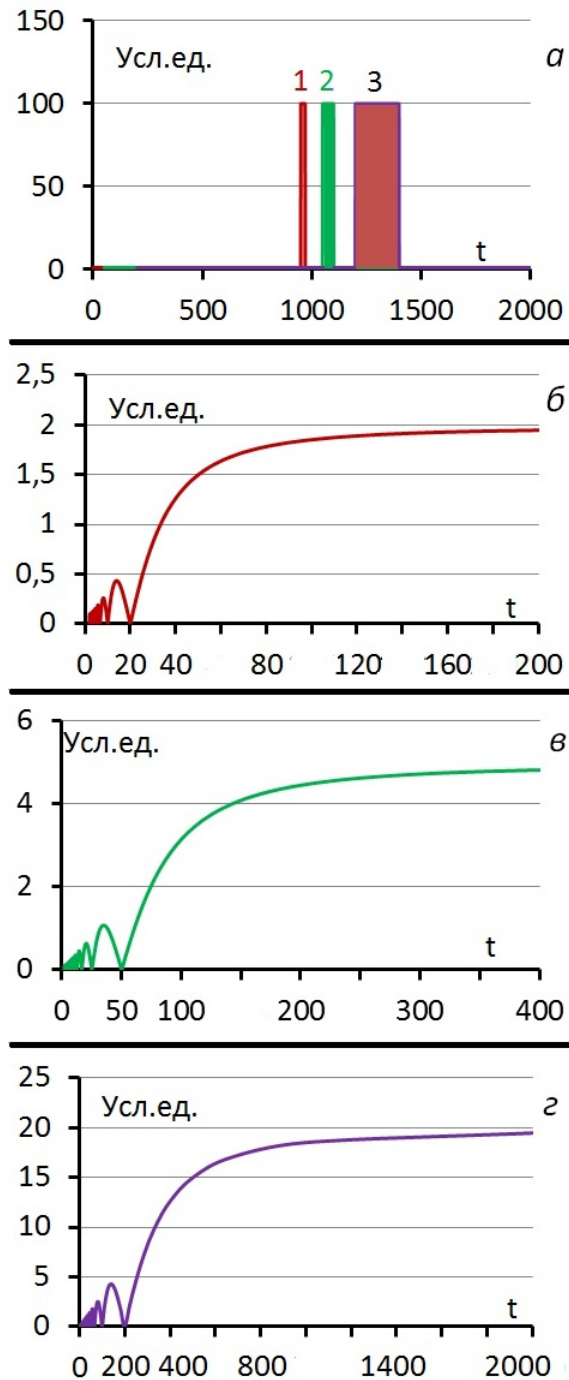


Рис. 6. Спектры для прямоугольных сигналов различной ширины: а – модели прямоугольных сигналов: 1 – сигнал шириной 20 условных единиц; 2 – сигнал шириной 50 условных единиц; 3 – сигнал шириной 200 условных единиц; б – спектр для модели 1; в – спектр для модели 2; г – спектр для модели 3.

большой интенсивностью. Других отличий не выявлено, вероятно, из-за того, что шаг наблюдения неупорядоченных вариаций составляет 1 мин. Необходимо также отметить, что пульсации силы тяжести и среднеквадратическая погрешность измерений, которая вычисляется в приборе, и их спектры совпадают между собой (рис. 8).

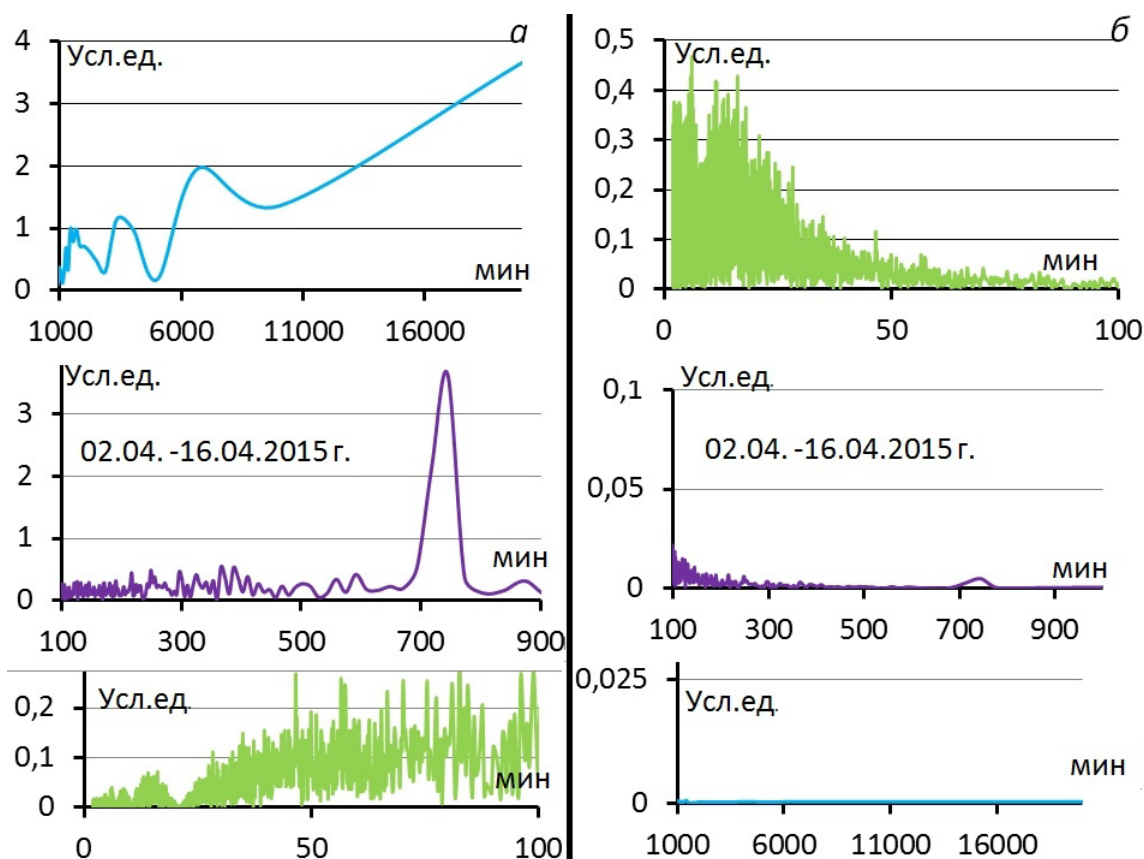


Рис. 7. Сравнение периодограмм осредненных и остаточных вариаций силы тяжести в апреле 2015 г.: а – спектральная плотность мощности пульсации силы тяжести во Владивостоке; б – спектральная плотность мощности пульсации силы тяжести в Бишкеке; в – периодограмма пульсации силы тяжести во Владивостоке; з – периодограмма пульсации силы тяжести в Бишкеке.

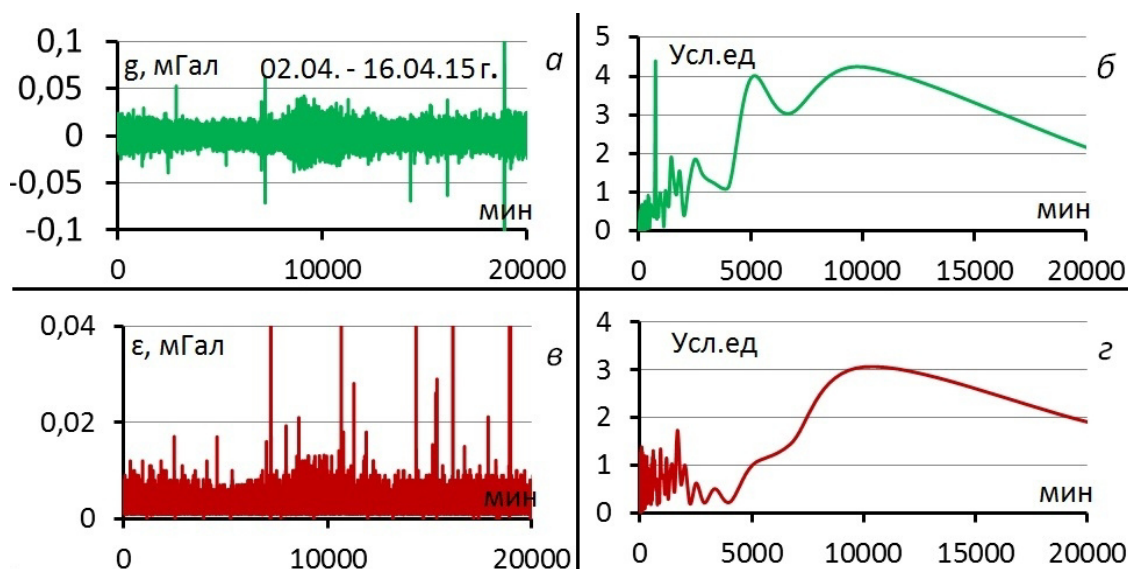


Рис. 8. Спектры остаточной вариации силы тяжести и среднеквадратической погрешности измерений в апреле 2015 г.: а – остаточная вариация силы тяжести; б – спектр остаточной вариации силы тяжести; в – среднеквадратической погрешности измерений силы тяжести; з – спектр среднеквадратической погрешности измерений силы тяжести.

Вернемся к спектрам остаточных непривливаемых вариаций силы тяжести. Они имеют относительно «высокочастотные» периоды (не более 15 мин.). Природа их мало понятна. Возможно, эти колебания можно связать с внутренними гравитационными волнами в

атмосфере [8], где указано, что их периоды не превышают 15 минут. Внутренние гравитационные волны обусловлены силой тяжести. Возникают они (волны) в результате изменения плотности воздуха с высотой, когда в условиях устойчивой температурной страти-

фикации атмосферы на элементарный объём воздуха, сдвинувшийся по каким-либо причинам вверх или вниз, действует возвращающая сила. Скорость распространения таких волн изменяется от десятков до сотен метров в секунду, длина достигает нескольких десятков километров и более. В нижней атмосфере амплитуды гравитационных волн невелики, однако в верхних слоях они растут вместе с уменьшением плотности воздуха. На высотах свыше 60 км может начаться быстрый нелинейный рост амплитуды волны, приводящий к её обрушению. При этом импульс и энергия волны передаются хаотически движущимся молекулам атмосферы, что изменяет температуру воздуха и скорость ветра. Данный процесс позволяет объяснить существование холодной летней и тёплой зимней мезопаузы на высоте около 80 км. К гравитационным волнам относят также атмосферные приливы (суточный и полусуточный), которые возникают во вращающейся атмосфере вследствие неравномерного во времени поглощения солнечной радиации озоном и водяным паром.

Заключение

Использование метода осреднения позволяет упростить методику выделения неприливных вариаций силы тяжести и разделения вариаций на низко- и высокочастотные составляющие. В результате применения метода осреднения нет необходимости вычисления лунно-солнечных вариаций силы тяжести и их исключения из наблюдаемого поля силы тяжести. Используемая методика разделения неприливных вариаций позволила определить возможные причины возникновения тех или других колебаний силы тяжести.

Воронежский государственный университет

*Антонов Юрий Васильевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры геофизики
E-mail: yuriyantонов@yandex.ru
Тел.: +7 (473) 220-83-85*

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю. В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Изв. вузов. Геол. и разведка, 2014. – № 5. – С. 54–57.
2. Антонов, Ю. В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов, Е. В. Воронцова // Изв. вузов. Геология и разведка, 2012. – № 3. – С. 63–67.
3. Антонов, Ю. В. Запаздывание приливной волны на суше / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика, 2013. – № 6. – С. 48 – 51.
4. Антонов, Ю. В. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика, 2013. – № 2. – С. 27 – 31.
5. Антонов, Ю. В. Особенности морфологии неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – Вып. 4. – С. 129–133.
6. Антонов, Ю. В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Геофизика, 2015. – № 1. – С. 67–71.
7. Богачёв, С. А. Солнечные вспышки / С. А. Богачёв, А. С. Кириченко // Земля и Вселенная, 2013. – № 5 – С. 3–15.
8. Дикий, Л. А. Теория колебаний земной атмосферы / Л. А. Дикий. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 195 с.
9. Рапопорт, М. Б. Вычислительная техника в полевой геофизике / М. Б. Рапопорт: Учебник для вузов. – М.: Недра. – 1993. – 350 с.
10. Howard, T. A. Stealth Coronal Mass Ejections: A Perspective / T. A. Howard, R. A. Harrison // Solar Physics, 2013. – С. doi: 10.1007/s11207-012-0217-0.
11. Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang [et al] // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1998. – Т. 454. – С. 903–995.

Voronezh State University

*Antonov Y. V., Doctor of Engineering, Corresponding Member of the RANS, professor Geophysical Department
E-mail: yuriyantонов@yandex.ru
Tel.: +7 (473) 220-83-85*